



Miljøministeriet  
Miljøstyrelsen

# **Filtermediers gangtid**

## **Rapport 7 i projektet**

### **”Smart Re-design of Drinking Water Production”**

MUDP Rapport

September 2023

Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion:

Søren Bastholm Olesen

Claus Paludan Hynkemejer

Loren Ramsay

Fotos:

Thomas Marius Nielsen, Amphi-bac Aps

Claus Paludan Hynkemejer, VCS

ISBN: 978-87-7038-547-3

Miljøstyrelsen offentliggør rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, som er finansieret af Miljøstyrelsen. Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter. Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Må citeres med kildeangivelse.

# Indhold

|                                          |           |
|------------------------------------------|-----------|
| <b>Forord</b>                            | <b>4</b>  |
| <b>Sammenfatning</b>                     | <b>7</b>  |
| <b>1. Introduktion</b>                   | <b>8</b>  |
| <b>2. Metoder</b>                        | <b>9</b>  |
| 2.1 Forsøgsopstilling                    | 9         |
| 2.2 Filtermaterialer                     | 10        |
| 2.3 Sporstofforsøg                       | 12        |
| 2.4 Indkøring af filtermaterialer        | 12        |
| 2.5 Fremgangsmåde ved gangtidsforsøg     | 12        |
| 2.6 Bestemmelse af jernkoncentration     | 12        |
| 2.7 Returskyl                            | 13        |
| <b>3. Resultater</b>                     | <b>14</b> |
| 3.1 Sporstofforsøg                       | 14        |
| 3.2 Gangtidsforsøg                       | 16        |
| 3.2.1 Jernfjernelse ved almindelig drift | 16        |
| 3.2.2 Opstuvning                         | 17        |
| 3.2.3 Gangtiden                          | 18        |
| 3.2.4 Skyllevandsforbrug                 | 19        |
| 3.2.5 Risiko for medieevækst             | 21        |
| <b>4. Konklusioner</b>                   | <b>23</b> |
| <b>5. Referencer</b>                     | <b>24</b> |

# Forord

Denne rapport er en del af fyrtårnsprojektet "Smart Re-design of Drinking Water Production", som blev udført i perioden 2018 - 2022 og finansieret af projektdeltagernes egenfinansiering samt den offentlige støtteordning Miljøteknologisk Udviklings- og Demonstrationsprogram (MUDP) under Miljøministeriet. Projektets formål er at re-designe vandbehandling ved en dyb forståelse og en radikal nytænkning af vandbehandlingsprocessen. Da projektet omhandler helt almindelig dansk vandbehandling, er projektets resultater relevante for alle danske vand-forsyninger.

Fyrtårnsprojektet er formidlet gennem 12 rapporter, samt en serie konferenceindlæg, tidskrifts-artikler, og seminarer. Desuden er en række løsninger demonstreret ved fuldskaalanlæg på hhv. Østerbyværket syd for Aarhus og Lundeværket nord for Odense.

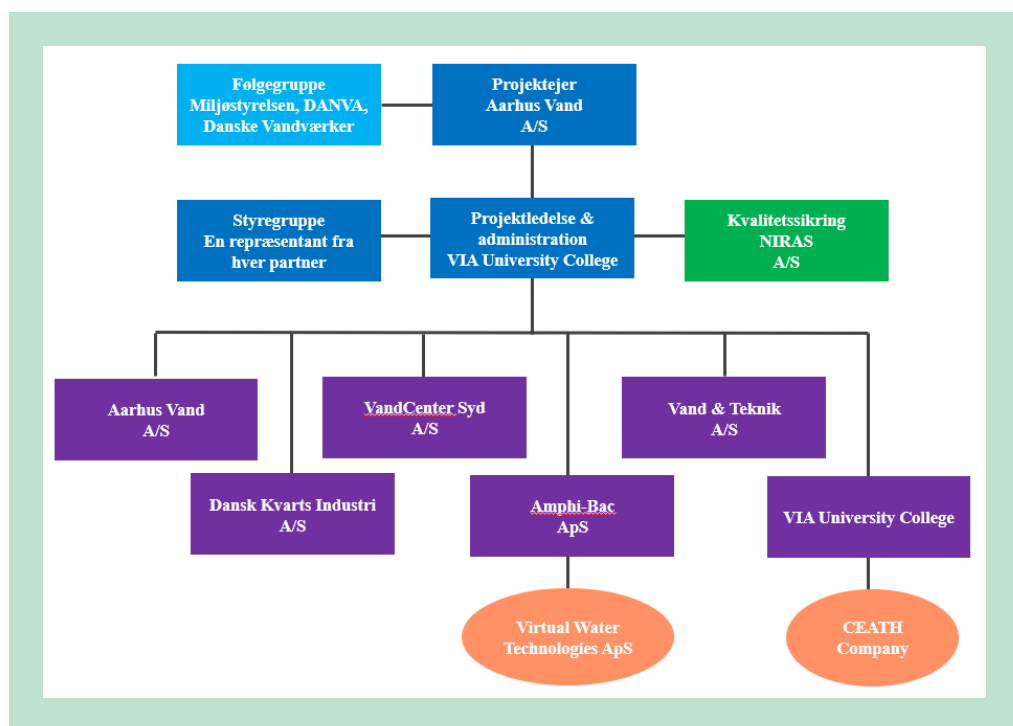
## Baggrund

I Danmark er drikkevandsproduktion baseret på grundvand. Grundvandet behandles ved en ret enkelt proces, der kaldes for "normalbehandling" (Karlsen og Sørensen, 2014). Denne proces består af iltning af vandet efterfulgt af en biofiltrering med gravitations- eller trykfiltre. Biofiltrering indebærer en kompleks blanding af fysiske, kemiske og mikrobiologiske elementer. Da det indvundne grundvand ofte er kemisk reduceret, kan vandet indeholde opløste stoffer som jern, ammonium og mangan, der skal fjernes/omdannes. Avanceret vandbehandling kommer kun på tale, hvis der også er behov for at fjerne f.eks. gasser (svovlbrinte, metan, aggressiv kuldioxid), hårdhed, arsen eller pesticider. I Danmark anvendes hverken chlor eller andre former for kemisk desinfektion under behandling eller distribution af vandet.

Biofiltrering er hjertet af normalbehandling af drikkevand i Danmark. Design og drift af biofiltrering har dog ikke ændret sig væsentligt i mere end 100 år. Manglende proces- og mikrobiologisk viden kombineret med en konservativ tilgang har medført, at videreudvikling af biofiltrering har været begrænset, og at filtre har været betragtet som en black box. Nye og billigere mikrobiologiske analyser, sofistikerede prøvetagningsmetoder, at-line målinger og andre fremskridt har nu åbnet denne black box i vandbehandlingen og gjort det muligt at undersøge, forstå og manipulere processen i højere grad end før.

## Projektorganisation

Projektet blev udført af syv partnere og to underleverandører, se FIGUR 1 nedenfor:



**FIGUR 1.** Diagram over projektorganisation.

Projektets følgegruppe og styregruppe bestod af følgende personer:

#### Følgegruppe

Bolette D. Jensen, Miljøstyrelsen (formand)  
 Dorte Skræm, DANVA  
 Robert Jensen / Henrik Hermansen, Danske Vandværker  
 Flemming Fogh Pedersen, Aarhus Vand (projektejer)  
 Loren Ramsay, VIA University College (projektleder)

#### Styregruppe

Flemming Fogh Pedersen, Aarhus Vand  
 Finn Møllerup, VandCenter Syd  
 Jens Kristensen, Vand og Teknik  
 Claus Hove Sørensen, Dansk Kvarts Industri  
 Søren Bastholm Olesen, Amphi-Bac  
 John Kristensen, NIRAS  
 Loren Ramsay, VIA University College

## Projektets arbejdsplaner og rapporter

Projektet er inddelt i arbejdsplaner og rapporter, se nedenfor. Arbejdsplanerne og rapporterne er identificeret som "åbne" eller "kommercielle" for at tydeliggøre, hvornår resultater frit formidles til hele branchen og hvornår resultater holdes internt blandt de relevante partnere af hensyn til kommercielle interesser.

### Arbejdsplan 1: Etablering af designgrundlag (åben)

Rapport 1: Indsamling af vandbehandlingsdata

Rapport 2: Merkur: Web-baseret platform til vandbehandlingsdata

### Arbejdsplan 2: Tekniske forsøg (åben)

Rapport 3: Flytning af filtermediekorn under returskyl

Rapport 4: Jernfjernelsesdybde i biofiltre

Rapport 5: Biostimulering med ammonium

Rapport 6: Jernfjernelse i returskyl

Rapport 7: Filtermediers gangtid

**Arbejdspakke 3: SmartSand (kommerciel)**

Rapport 8: Udvikling og produktion af SmartSand (fortrolig)

**Arbejdspakke 4: SmartArkitektur (åben)**

Rapport 9: Vandbehandlingsmodel

**Arbejdspakke 5: Fyrtårnsdemonstration i fuldskala (åben)**

Rapport 10: Demonstrationsanlæg ved Østerbyværket

Rapport 11: Demonstrationsanlæg ved Lundeværket

**Arbejdspakke 6: Projektledelse**

Rapport 12: Sammenfatning

# Sammenfatning

Denne rapport omhandler Filtermediers gangtid og er Rapport 7 af 12 om fyrtårnsprojektet "Smart Re-design of Drinking Water Production". Formålet med arbejdet er at belyse hvilket filtermateriale, der er bedst egnet til jernfjernelse. I Redesign-projektet skal der opføres et fuldskala forfilter til demonstration af jernfjernelse på Østerbyværket ved Aarhus Vand.

Undersøgelserne er baserede på laboratoriekolonner. En opstilling blev opført, så der kunne testes op til fire forskellige filtermaterialer ad gangen. Opstillingen bestod af fire stk. kolonner (Ø200 PVC-rør), som er 165 cm høje med en rustfri rist i bunden. Følgende 10 filtermedier blev undersøgt:

1. Kvarts 2-3 mm
2. Kvarts 1,2-2 mm
3. Grov E-clay 2-4 mm
4. Fin E-clay 0,8-1,6 mm
5. Knust glas 1,2-2,0 mm
6. Knust glas 2-5 mm
7. Antracit 1,4-2,5 mm
8. Bauxit Guy 1-3 mm
9. Stone Hard Dark 1-3 mm
10. Stone Hard Dark 2-5 mm

Forsøgene blev udført på Hovedværket, Odense, med iltet råvand. For hvert filtermedie blev der indledningsvis udført sporstofforsøg med saltvand. Herefter blev medierne indkørt. Gangtidsforsøgene bestod af at følge opstuvningsforløbet for at fastlægge gangtiden samt returskylning for at fastlægge jernfjernelse fra medierne.

Resultaterne viste at:

1. Fjernelse af jern under almindelig drift var acceptabel i alle tilfælde (>80%), dog ringest for medier med største kornstørrelse: kvarts (2-3 mm), knust glas (2-5 mm) og antracit (1,4-2,5 mm).
2. De længste gangtider blev opnået ved E-Clay (2-4 mm), antracit (1,4-2,5) og Stone Hard Dark (2-5 mm).
3. Knust glas (2-5 mm) og Stone Hard Dark (2-5 mm) ophobede >50% af gangtidens jernbelastning efter returskyl, hvorfor man vil forvente filtervækst over tid ved disse medier.

Resultaterne viste endvidere, at nyt E-Clay (2-4 mm) havde den smalleste gennembrudskurve ved sporstofforsøg, hvorfor dette medie er tættest på at udvise stempel flow.

På baggrund af forsøgene blev E-clay (2-4 mm) valgt til demonstration i fuldskala på Østerbyværket, dels på grund af dets positive egenskaber og dels, da der haves mindre erfaringer med dette medie.

# 1. Introduktion

Denne rapport omhandler Filtermediers gangtid og er Rapport 7 i projektet "Smart Re-design of Drinking Water Production". Formålet med rapporten er at belyse hvilket filtermateriale, der er bedst egnet til jernfjernelse.

I Redesign-projektet skal der opføres et fuldskala forfilter til jernfjernelse på Østerbyværket ved Aarhus Vand. For at vælge hvilket filtermateriale, der vil være det rette valg til det anlæg, er der i denne undersøgelse testet forskellige typer filtermaterialer.

Valget af de forskellige typer filtermaterialer til forsøget blev baseret på projektgruppens erfaringer og kendskab til de filtermaterialer, der er på markedet til jernfjernelse i dag.

De karakteristika, som det bedst egnede materiale gerne skulle have, er:

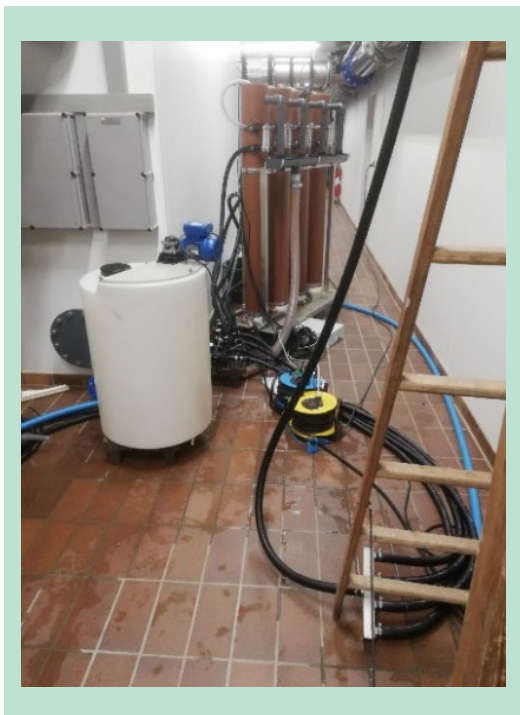
1. God evne til jernfjernelse
2. Lang gangtid
3. God evne til at jernet kan blive skyllet af under returskyllning, uden brug af store mængder vand

Undersøgelsen blev udført på Hovedværket ved VandCenter Syd, hvor testopstillingen blev lavet i kælderen på vandværket.

## 2. Metoder

### 2.1 Forsøgsopstilling

En opstilling blev opført, så der kunne testes op til fire forskellige filtermaterialer ad gangen. Opstilling består af fire stk. kolonner (Ø200 PVC-rør), som er 165 cm høje med en rustfri rist i bunden (se FIGUR 2). I bunden er der lagt 10 cm 3-5 mm kvarts som bærelag. Over bærelaget er der 80 cm filtermateriale i hver kolonne. Hvilke materialer, der skulle testes samtidigt i de fire parallelle kolonner, blev valgt ud fra kornstørrelse, da man kunne forvente mere ens gangtid ved mere ensartede kornstørrelser. Efter endt test af de første filtermaterialer blev materialerne suget op og nye materialer blev fyldt i kolonnerne, og testen gentaget.



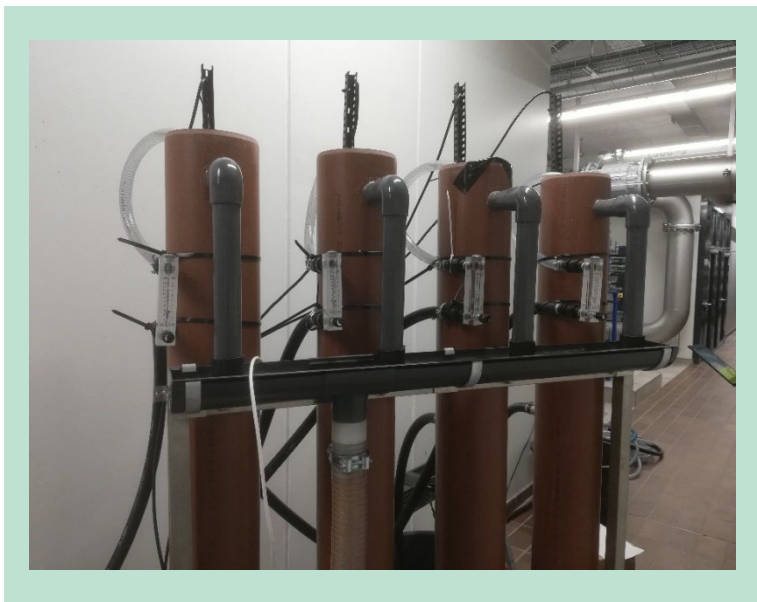
**FIGUR 2.** Test opstillingen i kælderen på Hovedværket ved VandCenter Syd.

På hver kolonne er der overløb og en trykmåler (tryktransmitter), der registrerer opstuvning. Data lagres på en data logger. Trykmåleren er placeret i vandet over sandet (se FIGUR 3). Iltede råvand tages ud som en delstrøm efter iltningen på vandværket og før vandværkets filtre. Hver kolonne har sin egen centrifugalpumpe og flowmeter, hvor flowet manuelt kan blive justeret.

Det iltede råvand pumpes op via en slange til toppen af kolonnen. Her bliver det fordelt ud over hele filteroverfladen og løber ned igennem filtermaterialet og ud i bunden via den rustfrie rist, hvorfra det afledes til kloak (se FIGUR 4). Der kan tages vandprøver i udløbsvandet, så det er muligt at måle indholdet af jern afgang filter for hver enkelt kolonne.

Forsøgsopstillingen blev ændret flere gange i starten, inden man endte med denne opstilling. Tidligere opstillinger var baseret på gravitation eller en fællespumpe og manifold. Udfordringen var at holde flowet af iltet råvand ens til alle fire kolonner under hele testen af hvert materiale. Tilgangen til hver kolonne kloggede til med okker, og derved blev flowet ikke ens til de fire kolonner. Opstillingen med en centrifugalpumpe og flowmeter for hver kolonne blev løsningen. Men det gav stadig lidt udfordringer, specielt ved en lav flowhastighed som følge af tilklogning i

nåleventiler. Hvor man løbende blev nødt til at efterjustere grundet et faldende flow ved at åbne mere op for nåleventilen i flowmåleren. Flowet blev målt på udløbet ved hjælp fyldning af en spand med kendt volumen og stopur for måling af fyldningstiden.



**FIGUR 3.** Testkolonnerne. I toppen trykmålerne og på siden flowmålerne med reguleringsventil.



**FIGUR 4.** Udløb fra testkolonnerne.

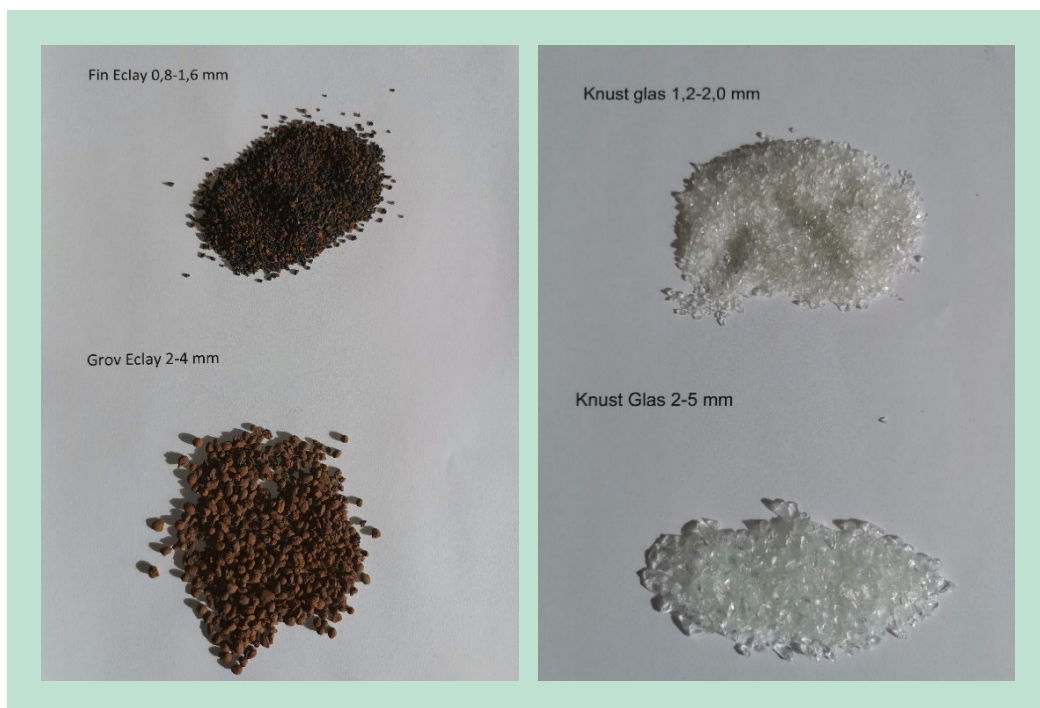
## 2.2 Filtermaterialer

Der er undersøgt meget kendte filtermaterialer som kvarts og antracit samt materialer, som er mindre udbredt (E-Clay og knust glas) og endelig materialer, som aldrig har været brugt på vandværker før (Bauxit Guy og Stone Hard Dark). Disse to materialer stammer fra firmaet Stonewalk (Addit) og består af granulat af hhv. aluminiummalm og jernaluminatsilikat.

Der er testet følgende typer filtermaterialer:

- 1: Kvarts 2-3 mm
- 2: Kvarts 1,2-2 mm
- 3: Grov E-clay 2-4 mm (FIGUR 5 tv)

- 4: Fin E-clay 0,8-1,6 mm (FIGUR 5 tv)
- 5: Knust glas 1,2-2,0 mm (FIGUR 5 th)
- 6: Knust glas 2-5 mm (FIGUR 5 th)
- 7: Antracit 1,4-2,5 mm
- 8: Bauxit Guy 1-3 mm (FIGUR 6 tv)
- 9: Stone Hard Dark 1-3 mm (FIGUR 6 th)
- 10: Stone Hard Dark 2-5 mm (FIGUR 6 th)



**FIGUR 5.** Fin og grov E-clay (venstre) samt fin og grov knust glas (højre).



**FIGUR 6.** Bauxit Guy (venstre) samt fin og grov Stone Hard Dark (højre).

## 2.3 Sporstofforsøg

Sporstofforsøgene er udført for at teste, om der er betydelige randeffekter ved materialerne. Endvidere bruges gennembrudsforløbet til at sammenligne materialerne. Der er udført sporstofforsøg på kolonnerne ved at tilsætte på en gang 10 gram NaCl opløst i 100 ml vand i toppen af hver kolonne, og derefter logge ledningsevnen ved udløbet af kolonnen. Vandopstuvning i toppen af kolonnerne var ca. 5 cm ved alle sporstofforsøg.

Der blev udført sporstofforsøg både ved 5 L/min (dvs. højt flow) og ved 2 L/min (dvs. lavt flow). Forsøgene blev udført på det nye materiale inden indkøring.

## 2.4 Indkøring af filtermaterialer

For at sikre, at de forskellige filtermaterialer havde de samme betingelser ved forsøgenes opstart, blev det valgt, at hvert filtermateriale først skulle påbegynde jernfjernelsen ved en indkøring. Det skete ved at filtrene belastes indtil der sker så stor en opstuvning som følge af jernudfældning i den øverste del af filteret, at filtret går i overløb. Sammen med vandet vil noget af de fine materialerester fra de forskellige filtermaterialer (fines) flyde med ud via overløbet. Efterfølgende blev hver kolonne skyllet som forklaret i næste afsnit 2.7 om returskyl. Hele forløbet med jernfjernelse, opstuvning og returskylning blev gentaget to gange for hvert filtermateriale inden forsøgene blev startet op.

## 2.5 Fremgangsmåde ved gangtidsforsøg

For at kunne sammenligne filtermaterialer er jernfjernelsen først indkørt (se afsnit 2.4). Der blev udført forsøg ved to forskellige filterhastigheder. Hvert forsøg blev gentaget to gange for hver af de to hastigheder.

Testplanen for hvert filtermateriale:

### 1. Første test ved lav hastighed

Kontrol og justering af flow alle hverdage. Måling af jernindholdet i udløbsvandet.  
Overvågning af overløb ved hjælp af data logger.  
Mht. overløb, skylning af kolonnen og måling af jern i skyllevandet (se afsnit 2.7)

### 2. Anden test ved lav hastighed (gentagelse).

### 3. Første test ved høj hastighed.

Kontrol og justering af flow alle hverdage. Måling af jernindholdet i udløbsvandet  
Overvågning af overløb ved hjælp af data logger.  
Mht. overløb, skylning af kolonnen og måling af jern i skyllevandet (se afsnit 2.7)

### 4. Anden test ved høj hastighed (gentagelse).

De anvendte flows var lav (2 L/min) og høj (5 L/min), svarende til filterhastigheder på hhv. 3,8 m/t og 9,6 m/t.

Der var udfordringer med at holde flowet ved test med 'lav hastighed' konstant og ens for test af de 10 filtermaterialer, hvorfor kun resultaterne ved høj hastighed er præsenteret. Grunden til det ligger i, at man ved lav hastighed blev nødt til at efterjustere nåleventilen på flowmåleren en gang i mellem, da nåleventilen kloggede til. Dette problem så man ikke så meget ved høj hastighed, hvor der kun var behov for at justere en gang i hverdagen og ikke i weekenderne.

## 2.6 Bestemmelse af jernkoncentration

Alle udtagne jernprøver er analyseret ved farvemetri med kittet LCK 321 til råvandet og LCK 521 til udløbsvandet samt skyllevandet (Hach, Lange ApS, Brønshøj). Målinger blev foretaget på et spektrofotometer (DR 2800, Hach Lange, Brønshøj). Prøver, hvor jernkoncentrationen overskred øvre måleområde for metoden, blev fortyndet med hanevand 100 gange.

## 2.7 Returskyl

Opstillingen er lavet så man kan skylle filterne rene med luft og med vand separat. Der var ikke frihøjde nok i opstillingen til at undgå, at noget af materialet ville blive skyllet væk ved et kombineret luft-og-vand skyl, hvorfor kombineret skyl ikke blev udført.

Skylleluften blev taget fra en kompressor, mens vandet blev taget fra værkets afgangsrør, hvor trykket ligger på 32-33 mVs.

Inden forsøgene startede op, undersøgte man, hvordan kolonnerne skulle skylles. Valget med luftskyl blev til 7 min med  $\frac{1}{2}$  bars tryk. Skylltiden med vand blev valgt forskelligt, da der var stor forskel på, hvornår de enkelte materialer var skyllet rene. Normalt var det efter ca. 2 min, men skylltiden blev fastlagt af den samme person ud fra en visuel vurdering af filterskylle. Her var det vurderingen at stoppe skyllningen når 75-80 % af overfladen på skyllevandet så rent ud. Skyllevandsflowet blev indstillet med de først materialer, men det viste sig, at give udfordringer ved de lette materialer (E-clay og antracit) i senere test, da disse havde tendens til at blive skyllet ud via overløbet. Derfor blev skyllevandsflowet justeret efter og tilpasset de enkle filtermaterialer og visuelt vurderet ved opstarten af skyllningen, så man kunne undgå at skylle filtermaterialer ud.

Skylleprogrammet blev:

1. Afsækning af vandet til det er 5 cm over filtermaterialet.
2. 7 min luftskyl ved  $\frac{1}{2}$  bars tryk
3. Renskyllning med vand, visuel inspektion af, at der er så højt flow som muligt uden at filtermateriale skylles ud dog maks. ca. 30 L/t i 3-4 min. Ved  $\varnothing 200$  mm giver dette en skyllevandshastighed på maks. ca. 57 m/t. Filterskyl med vand stoppes når overfladen er 75-80 % ren.

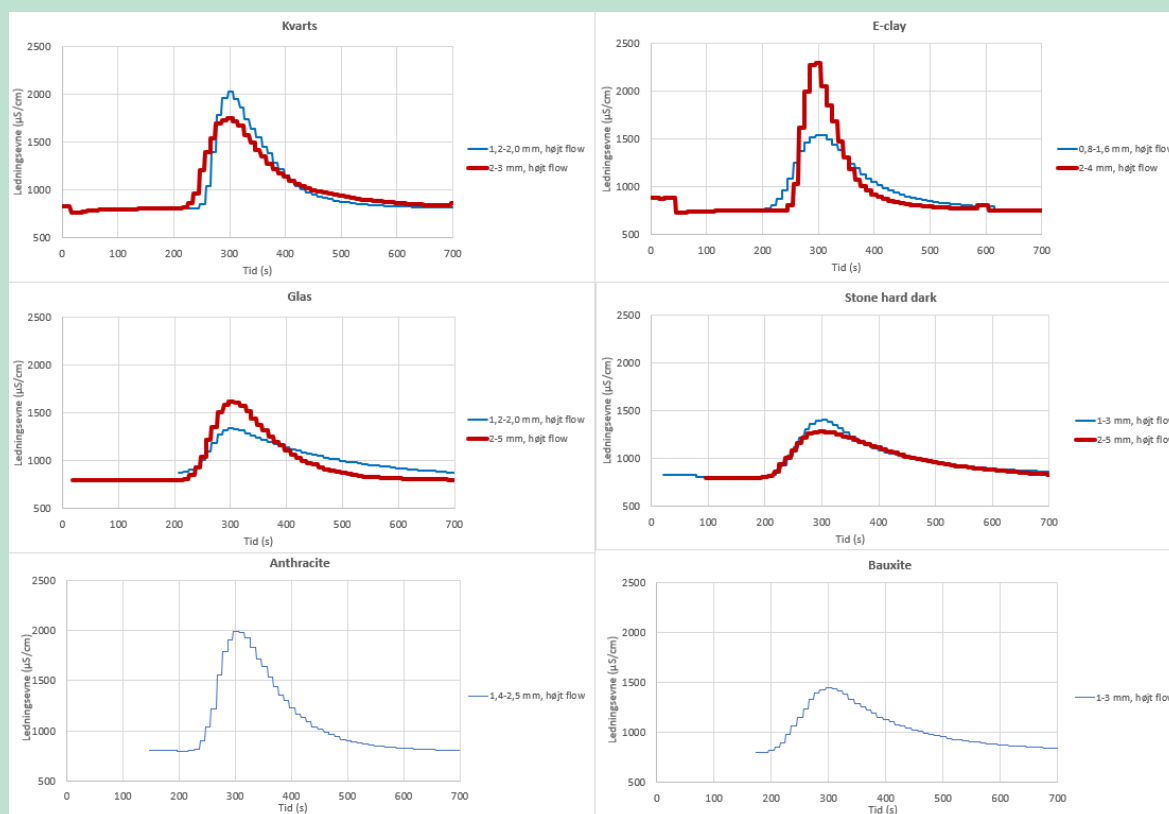
Filterskyllevand blev ledt til en 200L beholder, hvor der er monteret en omrører. Jernindholdet i skyllevandet (afgang filter) er størst i starten af returskyllningen. For at sikre en repræsentativ jernprøve af skyllevandet røres skyllevandet rundt i beholderen under hele returskyllningen. Efter endt returskyllning blev der udtaget en vandprøve fra beholderen, som blev analyseret for indholdet af  $\text{Fe}_{\text{total}}$ . (se afsnit 2.2) og skyllevandsmængden målt ved streger på skyllevandsbeholderen (for hver 10 L).

# 3. Resultater

## 3.1 Sporstofforsøg

Der er for alle 10 materialer udført sporstofforsøg med en saltopløsning. Sporstofforsøgene er udført for at teste, om der er hydrauliske forskelle mellem de forskellige filtermedier eller om der i de relativt små kolonner er betydelige randeffekter i form af kanaldannelse langs kolonnens væg. Jo større kornstørrelse i forhold til kolonnearealet, jo større risiko er der for randeffekter. Betydelige kanaldannelser forventes at kunne ses på kurveforløbet (ledningsevne som funktion af tiden), da gennembrud af salt vil vise sig som et hurtigt gennembrud og en lang hale.

Gennembrudskurver fra sporstofforsøget er vist i FIGUR 7. Kun forsøg ved flow på 5 L/min er vist.

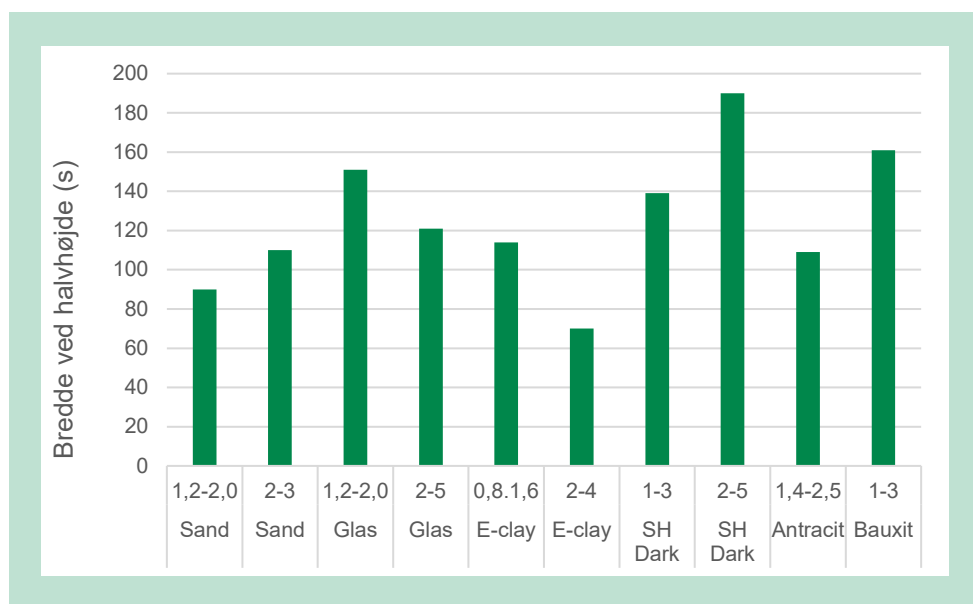


**FIGUR 7.** Gennembrudskurver for sporstofforsøg ved flow på 5 L/min. (højt flow) for alle 10 materialer. På grund af usikker tid for tilsætning af salt, blev X-aksen tilpasset så toppen kommer efter 300 s.

Som det ses af gennembrudskurverne, er der en hale på højre side af toppen. Dette er forventelig i kolonner, hvor der er tale om en vis opblanding på langs af strømningsretning (i modsætning til rent stempel flow). Denne opblanding kan ske ved strømning gennem filtermaterialet, men også i det opstuvende vand inden vandet når filtermaterialet. De aktuelle kurver viser ikke en større spredning i E-clay (som har en stor indre porøsitet, når det er nyt) end de øvrige materialer (der ikke har indre porøsitet).

Det kan heller ikke umiddelbart ses af FIGUR 7, at små korn af samme materiale (blå farver) medfører en anden spredning end store korn (røde farver).

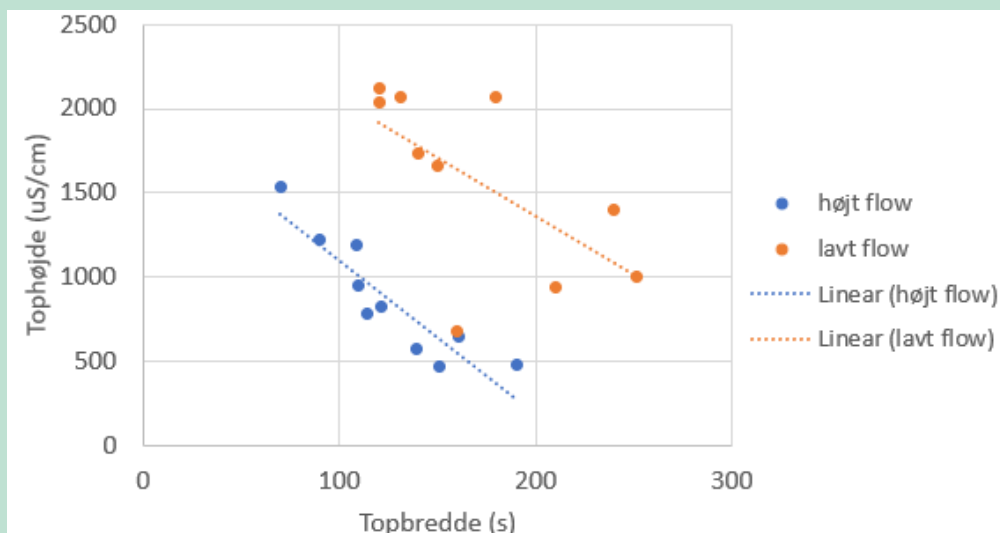
FIGUR 8 viser bredden ved halvhøjde for de forskellige filtermedier. Dette mål bruges som et udtryk for, hvor meget sporstoffet spredes på turen gennem filtermediet.



**FIGUR 8.** Gennembrudskurvernes bredde ved halvhøjde for et flow på 5 L/min (højt flow) for de forskellige filtermedier.

Som det ses af figuren, er der store forskelle mellem de enkelte medier. E-clay (2-4 mm) har den smalleste (og højeste) top, hvilket kan betyde, at dette medie tillader en hydraulik, der kommer tættest på stempel flow. Stone Hard Dark (2-5 mm) har den bredeste top og dermed størst spredning. En bred top og en lang hale kan skyldes medie med dual porøsitet (Lopato et al., 2013).

Gennembrudskurvernes form kan bl.a. belyses ved at kigge på toppenes højde og bredde, se FIGUR 9.



**FIGUR 9.** Forholdet mellem højden og bredden (ved halvhøjde) for gennembrudskurver for sporstofforsøg.

Som det ses af figuren, er der som forventet tydelig forskel på y-aksen mellem saltforsøg med lavt flow (orange, 3,8 m/t) og højt flow (blå, 9,6 m/t). Gennembrudskurven med lavt flow udviser højere og bredere toppe end højt flow.

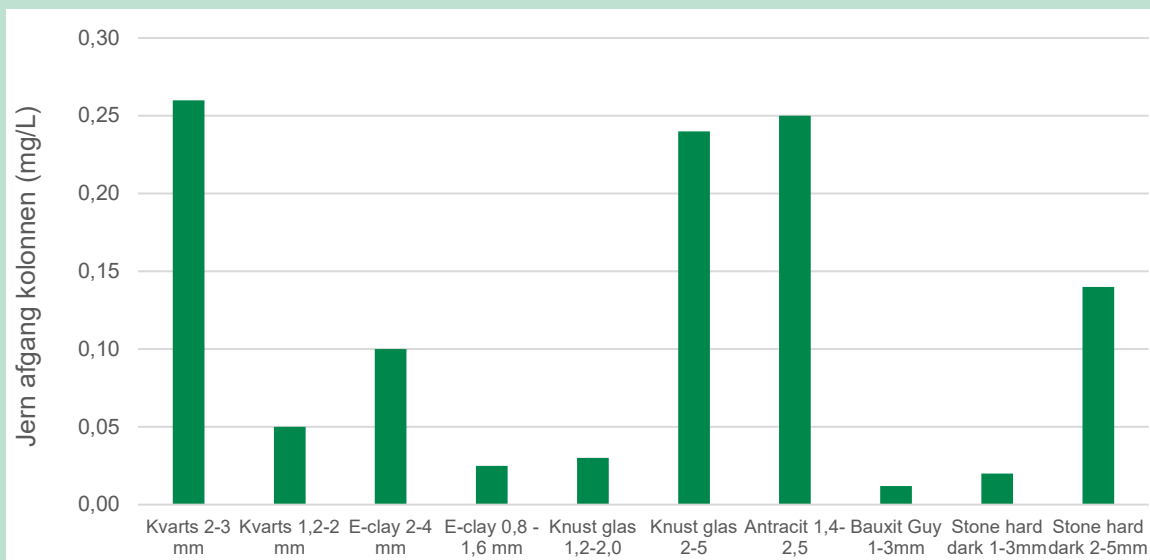
Det er tidligere vist (Yang et al., 2021) at højt flow medfører større dispersion (dvs. lavere toppe på grund af fortynding af sporstoffet med det omkringliggende vand). På x-aksen ses en begrænset forskel mellem højt og lavt flow (målt i sekunder), selv om flowforholdet er  $5/2=2,5$  gange. Det skyldes, at den større spredning ved højere flow til dels opvejer den kortere opholdstid for sporstoffet.

## 3.2 Gangtidsforsøg

Efter indkøring af filtermaterialet, blev kolonnerne returskyllet og starttidspunktet for idriftsætelse blev noteret.

### 3.2.1 Jernfjernelse ved almindelig drift

Jernkoncentrationen afgang kolonne er målt 1-3 gange i løbet af gangtiden, se FIGUR 10. De højeste værdier ses for stor kvarts, knust glas og antracit. For alle materialer fjernes over 80% af jernet, hvilket er acceptabelt, idet materialerne er tiltænkt forfiltre til jernfjernelse og rest jern vil blive fjernet på efterfiltre.

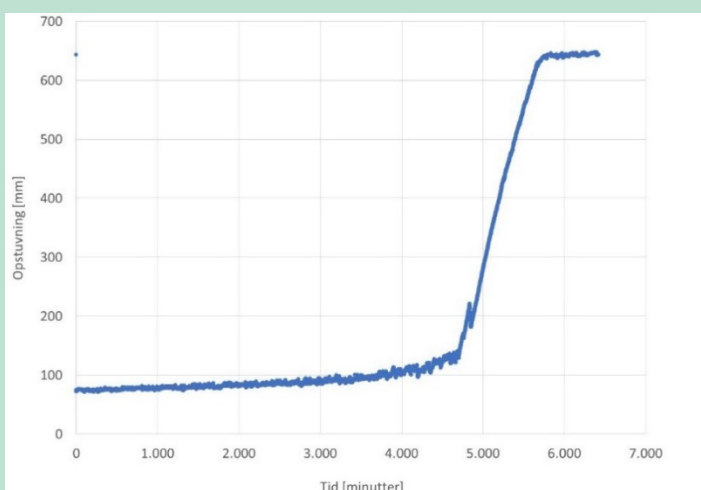


**FIGUR 10.** Jern ved afgang kolonne (gennemsnit af 1-3 målinger) for højt flow.

### 3.2.2 Opstuvning

Ved målinger af opstuvningen (tryktransmitter) i hver kolonne er gangtiden bestemt ud fra, hvornår 640 mm opstuvning er opnået, svarende til overløbskanten for kolonnen. Denne størrelse frihøjde er ikke usædvanlig for fuldskalaanlæg. I løbet af gangtiden er det aktuelle udløbsflow fra kolonnen målt på næsten alle hverdage. FIGUR 11 viser et eksempel på en opstuvningskurve.

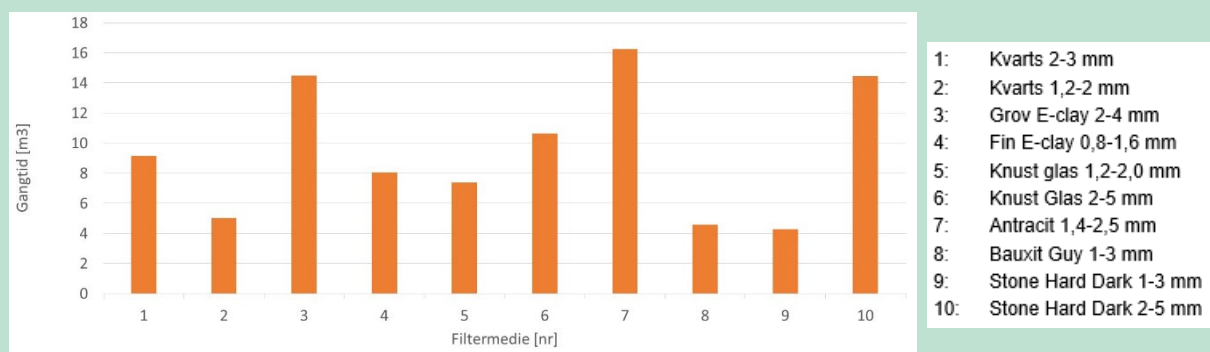
Figuren viser et typisk forløb, hvor opstuvning i starten er bestemt af svanehalshøjden og flowhastighed. Derefter kommer en lang periode, hvor opstuvning stiger ganske langsomt, hvorefter der sker en meget hurtig stigning til sidst. Når ændring i opstuvningen har nået 10% af det maksimale, er gangtiden allerede mere end 80% færdig.



**FIGUR 11.** Et eksempel på en opstuvningskurve målt med tryktransmitter. X-aksen viser tiden i minutter og y-aksen viser opstuvningen af vand målt i millimeter. Når opstuvningen når op på 640 mm er der overløb fra kolonnen, hvilket definerer slutningen af gangtiden for materialet (ca. fire dage i dette eksempel).

### 3.2.3 Gangtiden

Ud fra opstuvningskurverne samt flowet er gangtiden i m<sup>3</sup> bestemt. FIGUR 12 viser en sammenligning af mediernes gangtider. Råvandets gangtidsbelastning med jern samt filterhastighed er holdt ens for alle forsøg.

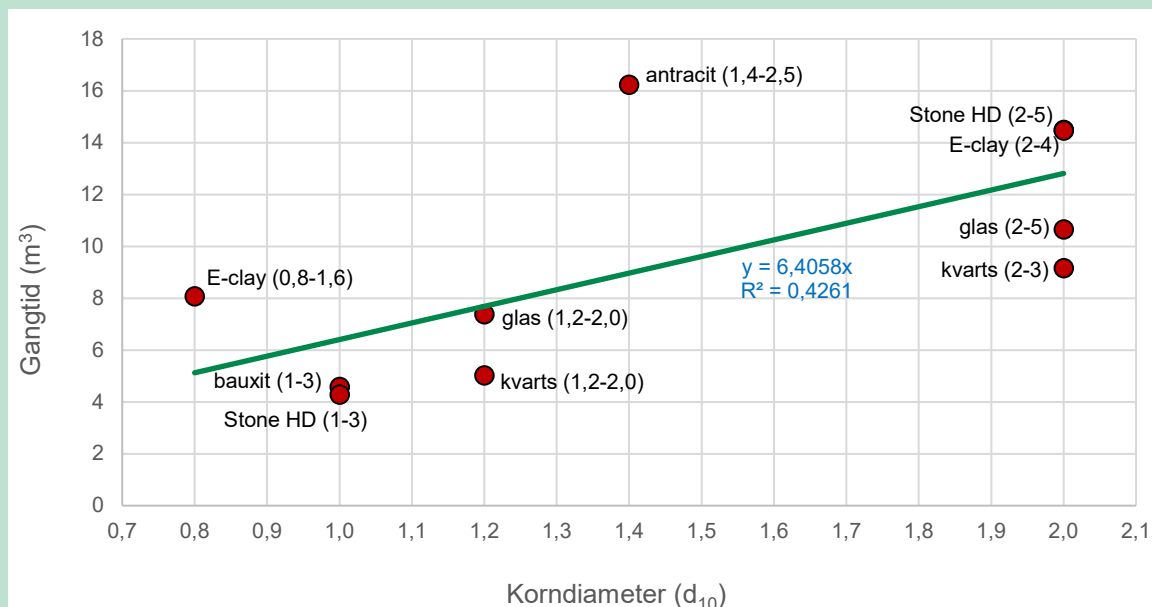


**FIGUR 12.** Gangtiden for de 10 undersøgte materialer ved flow på 5 L/min (højt flow).

Filtermaterialerne 3 (E-clay 2-4 mm), 7 (Antracit 1,4 – 2,5 mm) og 10 (Stone Hard Dark 2-5 mm) skiller sig ud ved at have de længste gangtider. Filtermaterialerne 3 (E-clay 2-4 mm), 10 (Stone Hard Dark 2-5 mm) og 5 (knust glas 2-5 mm) har de største kornstørrelser, som er anvendt i forsøget, hvilket kan være en fordel, hvis der ønskes en lang gangtid mht. jernfjernelse, eftersom dybdefiltrering og derved bedre udnyttelse af filtermaterialet nemmere opnås.

Forskellen mellem de korteste og længste gangtider er mere end en faktor 3. Hermed har filtermediet stor indflydelse på gangtiden.

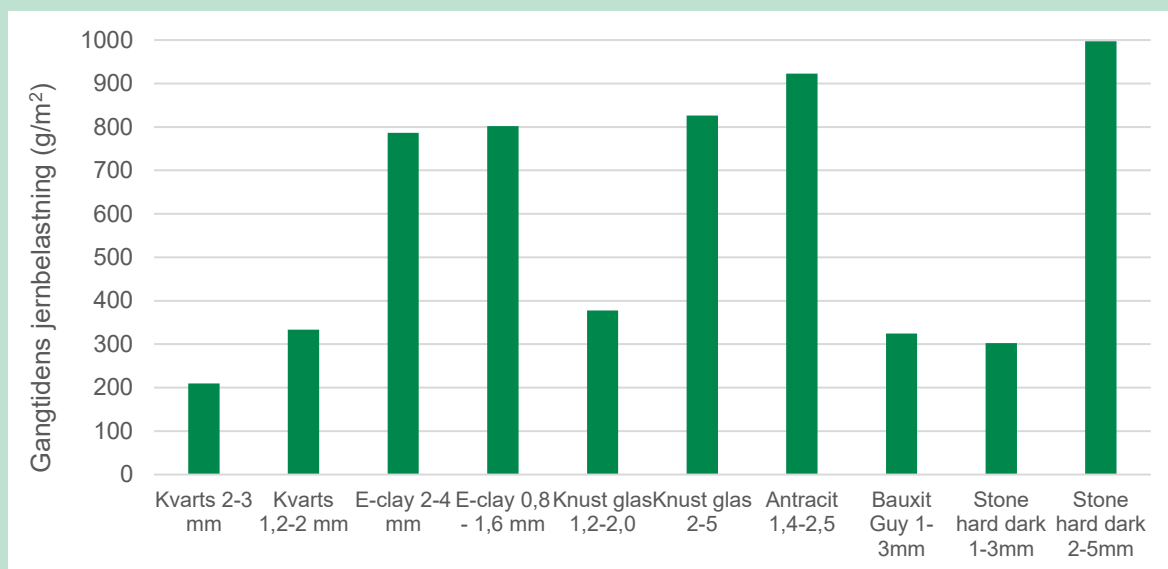
FIGUR 13 viser gangtider som funktion af mediets kornstørrelse (angivet som  $d_{10}$ ).



**FIGUR 13.** Forhold mellem gangtid (gennemstrømmede vandmængde inden opstuvning til overløb) og mindste tal i intervallet af filtermediets korndiameter.

Som det ses af figuren, er der en klar sammenhæng. Det mest bemærkelsesværdig er antracit, der viser en uventet lang gangtid på over 16 m<sup>3</sup>. Det er også interessant, at begge størrelser af kvarts ligger under strengen og dermed har kortere gangtider i forhold til kornstørrelsen (målt som d<sub>10</sub>).

Gangtidens jernbelastning (loading af kolonnerne med jern over en gangtid) beregnes ud fra kolonnernes tværsnitsareal (0,0314 m<sup>2</sup>) og jernindholdet i råvandet (ca. 1,48 mg/L), se FIGUR 14.



**FIGUR 14.** Gangtidens jernbelastning for 10 forskellige filtermedier.

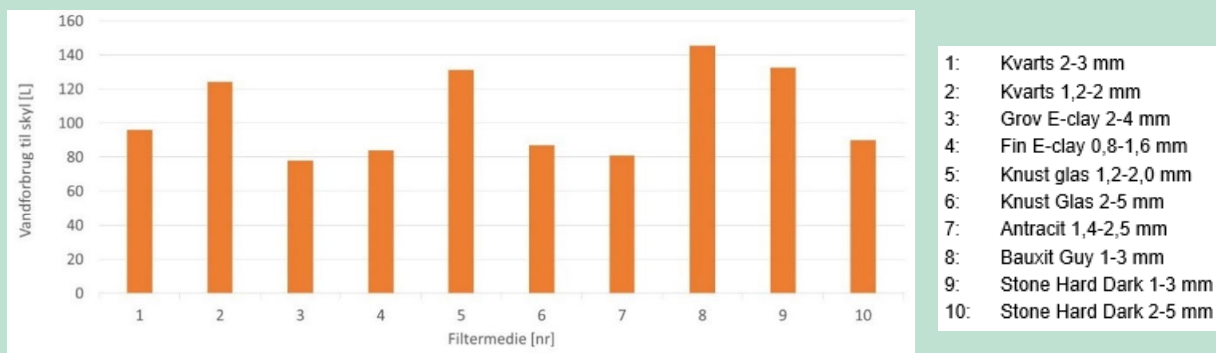
Som det ses af figuren, ligger medierne i to grupper: i intervallet 200-400 g/m<sup>2</sup> og i intervallet 800-1000 g/m<sup>2</sup>. Et typisk interval for ét-mediefiltre fra lærebogen Vandforsyning (Karlsen og Sørensen, 2014) på 0,6-0,9 kg/m<sup>2</sup> (gælder for råvand med 2-5 mg/L jern). I praksis er dette ikke altid opnået. I Redesign-projektet er der målt tilført jern på en gangtid på 10 fuldskala vandværker (Rapport 2). Her var medianværdien 260 g Fe/m<sup>2</sup> og er dermed i tråd med de mindre kornstørrelser i denne undersøgelse.

### 3.2.4 Skyllévandsforbrug

For at være et velegnet filtermedie i forhold til returskyl, skal skyllévandsforbruget være lavt og alt jern fra gangtidens jernbelastning skal slippe mediet under returskyl for at der ikke sker medievækst over årene. I det følgende belyses disse to succeskriterier.

Der er anvendt samme returskylleprogram (med undtagelse af vandskyllets varighed og flow) til alle filtermaterialer, og der er derfor ikke taget hensyn til muligheden for at optimere returskyllet trin eller flow til det enkelte filtermateriale. Eksempelvis vil graden af fluidisering være afhængig af filtermediets densitet, hvilket kan have indflydelse på, hvor effektivt returskyllet er.

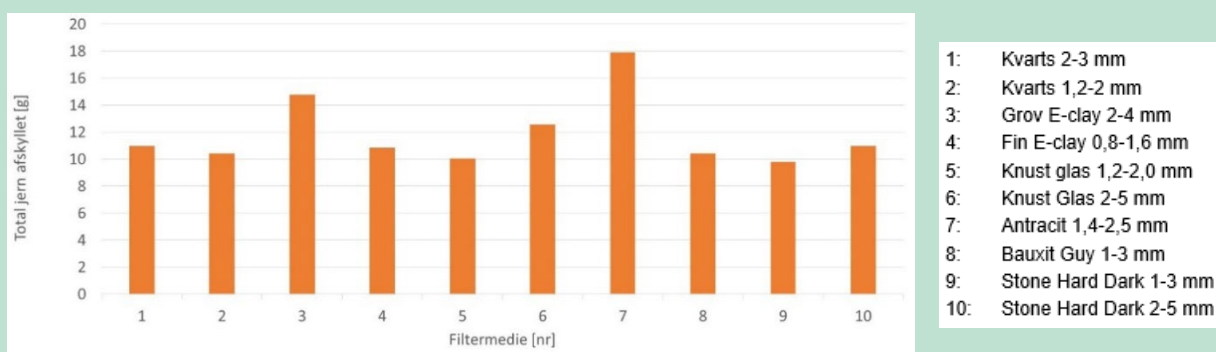
Returskyllevandet er opsamlet i en 200L beholder med omrøring. Skyllévandsforbruget er målt ved aflæsning af niveauet i beholderen og vist på FIGUR 15.



**FIGUR 15.** Vandforbrug til filterskyl.

Med en skylletid baseret på en visuel bedømmelse af hvornår filtermaterialet er renskyllet, ses det, at der skal bruges mindre vand til returskyl af E-Clay (begge størrelser), antracit og knust glas (kun store korn) end for de øvrige filtermaterialer. E-Clay og antracit har mindre densitet end de øvrige materialer. Det kan betyde, at returskylleprocessen er mere effektiv for disse materialer, da E-Clay og antracit fluidiserer ved lavere skyllehastigheder. Det er dog ikke undersøgt, om det er tilfældet ved disse forsøg. At der også bruges relativt lidt vand til at renskylle knust glas (store korn), kan skyldes den meget glatte overflade, der let slipper udfældede jernoxider.

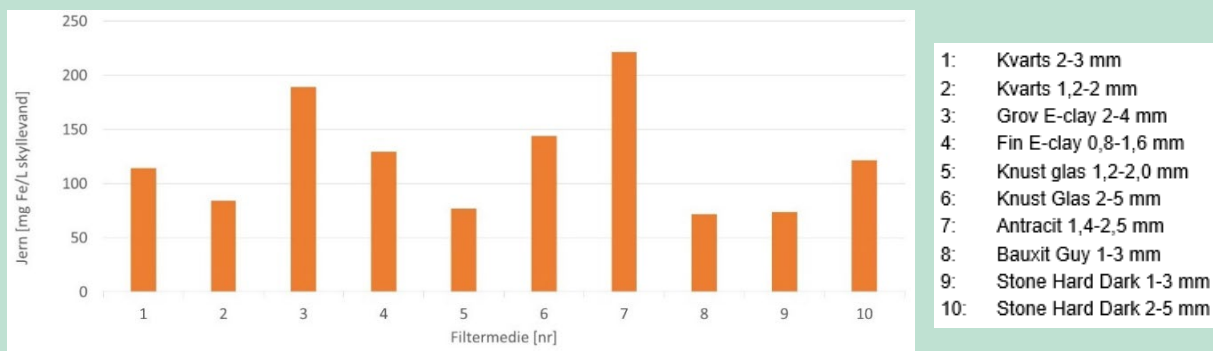
Ved at måle jernkoncentrationen i det opblandede skyllevand er den totale mængde afskyllet jern estimeret, hvilket er vist på FIGUR 16.



**FIGUR 16.** Sammenligning af mængden af afskyllet jern ved returskyl af kolonnen.

Det ses på FIGUR 16, at der afskylles mest jern fra filtermateriale 7 (Antracit 1,4 – 2,5 mm).

FIGUR 14 viste, at de forskellige filtermedier havde forskellige gangtidsbelastning med jern, hvilket er hovedårsagen til de forskellige afskyllede jernmængder på FIGUR 16. For at sammenligne filtermedierne både mht. hvor meget jern der er afskyllet samt mængde af forbrugt skyllevand hertil, er FIGUR 17 udarbejdet. Her er FIGUR 16 og FIGUR 15 kombineret for at vise skylleeffektiviteten, udtrykt som mg Fe/L skyllevand.

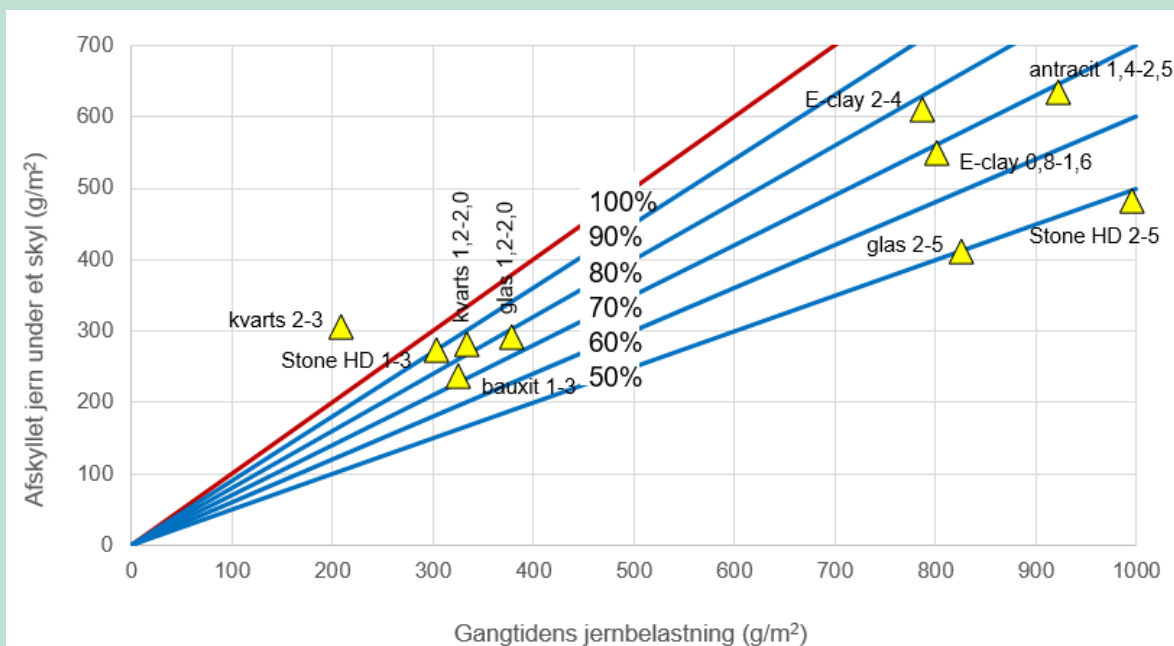


**FIGUR 17.** På y-aksen er mg Fe afskyllet, divideret med antal liter vand brugt til returskyllet.

Her ses, at antracit og grov E-clay blev skyllet mest effektivt.

### 3.2.5 Risiko for medievækst

For at et filtermedie ikke vokser, er det vigtigt at mediet kan slippe hele den afsatte mængde jernoxider. FIGUR 18 viser mediernes skylbarhed ved at sammenligne den afskyllede mængde jern under et skyl med den afsatte mængde jern over den foregående gangtid (gangtidens jernbelastning).



**FIGUR 18.** Filtermediernes skylbarhed.

Som det ses af figuren, er der to adskilte grupper af målinger (se især x-aksen): 5 medier, hvor der tilføres under 400g jern/m<sup>2</sup> før der skal returskylles og fem andre, der ikke tilkloger så let og hvor der tilføres mere end 700 g Fe/m<sup>2</sup> før der skal skylles. De fem, der ikke tilkloger så let er som forventet de lette medier (E-clay, begge størrelser og antracit) og de store kornstørrelser (knust glas og Stone Hard Dark, men ikke kvarts).

FIGUR 18 viser et enkelt resultat (kvarts 2-3 mm), hvor der er skyllet mere af, end der blev afsat (over den røde 100% streg), hvilket tyder på fejl. For de øvrige resultater, blev der fjernet

under 100% af det tilførte jern, nogle gange under 50% (knust glas 2-5 mm og Stone Hard Dark 2-5 mm). Ved en massebalance for jern ved brug af forskellige skylleprocedurer (udført under Redesign-projektet i fuldskala på Lundeværket, se Rapport 6) fandt man i gennemsnit, at den afskyllede jern svarer til 76% af den foregående gangtids jernbelastning. Resultaterne i FIGUR 18 er dermed i samme størrelsesorden.

## 4. Konklusioner

Denne forsøgsrække havde til formål at undersøge hvilket filtermateriale, der skal anvendes i jernfjernelsesfilteret på en demonstrationsanlægget på Østerby. Der er undersøgt meget kendte materialer som kvarts og antracit samt filtermaterialer, som er mindre udbredte (E-Clay og knust glas) og endelig filtermaterialer, som ikke har været brugt på vandværker før (Bauxit Guy og Stone Hard Dark).

For at være et godt filtermedie, skal mediet:

1. Være god til at fjerne jern under almindelig drift.
2. Muliggøre lange gangtider før filtret tilklogges og skal returskylles.
3. Let slippe det tilbageholdte jern for at minimere skyllevandsforbrug og undgå filtervækst.

Resultaterne viste følgende:

1. Fjernelse af jern under almindelig drift var acceptabel i alle tilfælde (>80%), dog ringest for filtermedier med størst kornstørrelse: kvarts (2-3 mm), knust glas (2-5 mm) og antracit (1,4-2,5 mm).
2. De længste gangtider blev opnået ved E-Clay (2-4 mm), antracit (1,4-2,5 mm) og Stone Hard Dark (2-5 mm).
3. Knust glas (2-5 mm) og Stone Hard Dark (2-5 mm) ophobede >50% af gangtidens jernbelastning efter returskyl, hvorfor man vil forvente filtervækst over tid ved disse medier.

Resultaterne viste endvidere, at nyt E-Clay (2-4 mm) havde den smalleste gennembrudskurve ved sporstofforsøg, hvorfor dette medie er tættest på at udvise stempel flow.

Der kunne selvfølgelig laves mange opfølgende forsøg, men projektgruppen har på baggrund af disse forsøg valgt at anvende E-Clay 2-4 mm som filtermateriale i fuldskalaforsøget på Østerby Vandværk. E-Clay er valgt fremfor antracit pga., at det er et mindre kendt materiale end antracit, som er testet og anvendt i mange sammenhænge. Erfaringer med E-Clay i fuldskala har derfor et større potentiale for at frembringe ny viden.

## 5. Referencer

Lopato, L., Röttgers, N., Binning, P.J., Arvin, E., 2013. Heterogeneous nitrification in a full-scale rapid sand filter treating groundwater. *J. of environmental engineering*.

Yang, Y., Liu, T., Li, Y., Li, Y., You, Z., Zuo, M., Diwu, P., Wang, R., Zhang, X., and Liang, J., 2021. Effects of Velocity and Permeability on Tracer Dispersion in Porous Media. *Appl. Sci.*, Vol. 11.

## Filtermediers gangtid

I Danmark er drikkevandsproduktion baseret på grundvand, der behandles ved en enkel proces, der består af iltning af vandet efterfulgt af en biofiltrering med gravitations- eller trykfilter. Herved fjernes eller omdannes jern, ammonium og mangan. Design og drift af biofiltrering, som er hjertet i vandbehandlingen, har ikke ændret sig væsentligt i mere end 100 år. Fremskridt i prøvetagning og måleteknikker i forbindelse med biofiltrering har imidlertid medført ny viden og mulighed for at undersøge, forstå og manipulere de kemiske, mikrobiologiske, fysiske og procesteknologiske elementer i drikkevandsbehandling. Vandkvaliteten er under pres, og der er en erkendelse af, at mange af de nuværende overskridelser af vandkvalitetskrav på landsplan kunne undgås ved en bedre vandbehandling.

Projektets formål er at re-designe vandbehandling fra bunden ved radikal nytænkning af drikkevandsproduktionen, hvormed der kan ske en optimering af nye og eksisterende vandværker, herunder reduktion af vandspildet ved returskyl, forkortelse af indkøringen af nye filtre samt større bæredygtighed i drikkevandsproduktion. Projektet har resulteret i formulering af 18 "redesign-principper", der handler om design og drift af drikkevandsbehandling. Principperne blev testet ved fuldskala demonstration af ny filterbeholderdesign samt ny indkøringsprocedure med SmartSand. Endvidere blev principperne udviklet på basis af ny viden om jern- og ammoniumfjernelse samt returskylleprocessen. Projektet har desuden påbegyndt udvikling af den åbne dataplatform "Merkur" til vandbehandlingsdata samt en matematisk model til at belyse virkningen af forskellige filterkonstruktioner



Miljøstyrelsen  
Tolderlundsvej 5  
5000 Odense C

[www.mst.dk](http://www.mst.dk)